

BEAM TRANSPORT FROM XFEL-LINAC TO STORAGE-RING IN SPring-8

Kenji Fukami^{*A),B)}, Takahiro Fujita^{A),B)}, Noritaka Kumagai^{B)}, Chikaori Mitsuda^{A),B)},
Masaya Ohishi^{A),B)}, Haruo Ohkuma^{A),B)}, Yuichi Okayasu^{A),B)}, Masazumi Shoji^{A),B)},
Koji Tsumaki^{A),B)}, and Takahiro Watanabe^{A),B)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Saya-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)}RIKEN, SPring-8 Joint Project for XFEL

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Saya-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

A beam transport line was designed from XFEL-Linac to the storage ring in the SPring-8 to use ultra-short bunched 8-GeV electron beam at the storage ring. An extracted beam from the XFEL-Linac is jointed on SSBT line near the extraction point from the booster synchrotron and then is injected to the storage ring. It is necessary to bend the beam 55.2degrees in horizontal direction. In addition, it is necessary to bend in vertical direction because ground level of the connection point is 9m lower than that of the XFEL. To avoid bunch lengthening and emittance growth due to dispersions and CSRs, all the magnets on the bending sections are arranged by Chasman-Green lattice. Bunch length and horizontal emittance at the connection point to the SSBT and at the injection point to the storage ring are shown in this paper.

SPring-8 における XFEL-Linac から蓄積リングへのビーム輸送

1. はじめに

現在、SPring-8 キャンパス内に XFEL 用の線型加速器 (XFEL-Linac) を建設中である。この加速器では電子ビームを 8GeV まで加速し、加速器の下流に設置されたアンジュレータにより最短波長 0.06nm の X 線レーザーを発振させる。効率よく発振させるため、加速後の電子ビームのバンチ長は 50fsec、Emittance は 0.04nmrad で設計されている^[1]。これらの値は、現状の蓄積リングでの値 (バンチ長 15psec、水平方向 Emittance 3.0nmrad) に比べて 2 桁程度小さい。

一方、SPring-8 では蓄積リングの Emittance を大幅に小さくするための改造を計画中である。改造後のリングに XFEL-Linac のビームを入射し、現状よりさらに高輝度で短パルスの放射光利用を検討している。そのために、XFEL-Linac から蓄積リングへのビーム輸送系について検討、設計、及び製作を行った。

2. 設計

2.1 概形

XFEL-Linac とブースタシンクロトロンとの位置関係を図 1 に示す。シンクロトロンの出射用直線区間に平行に外周側へ 1125mm の位置にビームを導き、シンクロトロンの出射点から 13.4m 下流で、蓄積リングまでの既設のビーム輸送系 (SSBT) に合流させる。

シンクロトロン出射直線に平行にするため、XFEL-Linac の出射ビームを水平方向偏向電磁石 9 台で 55.2 度曲げる。また、上記の合流点は XFEL-Linac のビームラインの高さより 9m 低い位置にある。このため垂直方向偏向電磁石 2 台で下方に 10 度曲げた後、再度 2 台で上方に 10 度曲げ戻す。SSBT への合流点までの距離

は 301.2m、蓄積リング入射点までの距離は 597.9m である。

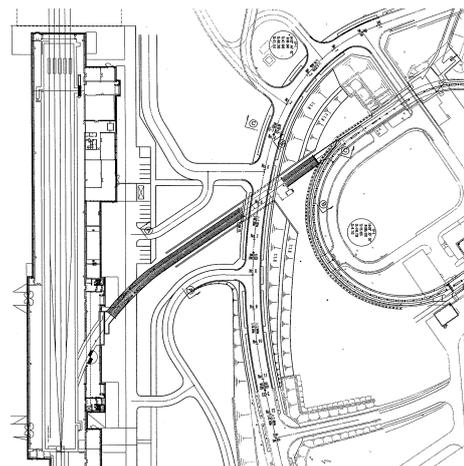


図 1: XFEL-Linac から蓄積リングへのビーム輸送経路。左が XFEL-Linac 出射後のアンジュレータ用ビームラインであり、ビームは下から上に向かう。右上のリングがブースタシンクロトロンを示す。この間を結ぶ左下から右上のラインが新規ビーム輸送系である。

2.2 オプティクス

偏向電磁石で電子が曲げられる際に発生する Synchrotron Radiation (SR) のうち、電子バンチ長よりも波長の長い成分はコヒーレント性を示す。この成分を Coherent Synchrotron Radiation (CSR) と呼ぶ。CSR やディスペーションによりバンチ長は伸び、Emittance も増大する。この効果を抑制するため偏向電磁石区間を全て

* fukami@spring8.or.jp

Chasman-Green 型ラティスで構成した。ディスパージョンは最大で 0.57m とした。直線部は基本的に FODO と、これらのラティス間のマッチングセクションで構成した。SSBT 合流点前までのベータ、ディスパージョン関数を図 2 に示す。

ブースタ射出直線区間に平行に入射してきたビームを偏向電磁石により 110mrad 曲げて SSBT へ合流させる。SSBT への合流点付近の機器配置図を図 3 に示す。合流点から 27.6m 下流のディスパージョンフリーの場所をマッチングポイントとし、ツイスパラメータを全て SSBT と一致させる。当面は SSBT のオプティクスは保持するものとした。ブースタからの入射もそのままできるよう、合流点からマッチングポイントまでは既設電磁石を移動させず、マッチングを行うための四極電磁石の追加のみ行った。

合流点からマッチングポイント間にブースタ用ビームダンプへの分岐点がある。新規ビームライン単独での調整を行うため、XFEL-Linac からのビームをビームダンプに入射するための四極電磁石のパラメータも決定した。このライン上では OTR モニタを使って Emittance の測定を行う予定である。

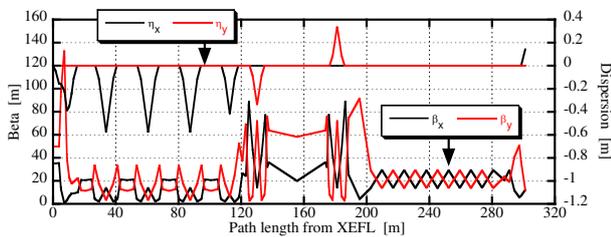


図 2: SSBT 合流点より上流のビームトランスポートラインのベータとディスパージョン。

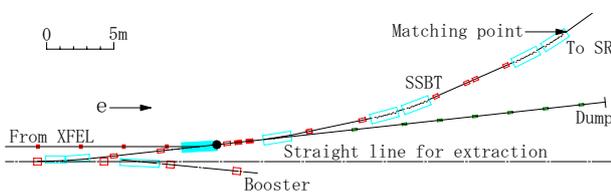


図 3: SSBT への合流点 (黒丸) 付近の機器配置図。青は偏向電磁石、赤は四極電磁石を示す。塗りつぶしは、新規トランスポート用の電磁石を示す。ビームダンプラインには Emittance 測定用の OTR モニタ (緑) が並ぶ。

2.3 電磁石

偏向電磁石の仕様を表 1 にまとめた。水平、垂直方向の偏向電磁石をそれぞれ 9 台 (表 1 の Hor.1) と 4 台 (Ver.) 製作した。断面形状は H 型とし、長手方向はセクター型とした。電磁石の寸法を小さくし製作コストを抑えるため、ギャップ寸法を 30mm とした。磁場の水平方向平坦度は、 $\pm 5\text{mm}$ の範囲で 1×10^{-4} とした。四極電磁石の最大磁場勾配は 70T/m とし、要求される積分磁場に依じて 3 タイプに分けて 57 台製作した。ボア径は

29mm とした。磁場勾配の水平方向平坦度は、 $\pm 5\text{mm}$ の範囲で 1×10^{-3} とした。水平、垂直方向のステアリング電磁石をそれぞれ 10 台製作した。ギャップ寸法を 40mm とした。最大キック角は 0.5mrad とした。

以上の電磁石に加えて、SSBT 合流用として水平方向偏向電磁石 1 台 (表 1 の Hor.2) と四極電磁石 2 台を製作予定である。ビームコースの高速切り替えが可能となるよう、偏向電磁石の鉄芯は 0.5mm 厚の積層鋼板とした。四極電磁石のボア径は現状の SSBT に合わせて 42mm とした。磁場の平坦度に関しては、上記と同等とした。

表 1: Specification of dipole magnets

Type	Hor.1	Hor.2	Ver.
Air gap [mm]	30	30	30
Field [Tm]	3.06	3.68	2.63
Flux [AT/Pole]	300x54	300x56	300x54
Length [m]	2.252	2.615	1.941
Number	9	1	4

2.4 真空

入射ビームの Emittance、Energy spread とともに小さいので、真空チェンバのサイズを小さくすることは可能である。しかしながら、チェンバ内壁とビームとの距離が近づくと Wake field によるエネルギーの広がりが顕著になる。このため、四極電磁石部では内径 24.8mm、偏向電磁石部では内部高さ 24mm のステンレス製チェンバとし ICF70 フランジで接続した。電子ビームの散乱を防ぐため、最大圧力が 10^{-4}Pa 以下となるよう排気系を設計した。

2.5 モニタ

ビーム電流計、プロファイルモニタ、ビーム位置モニタを製作した。ビーム電流計は SSBT で使用しているものと同じ仕様とした。短バンチビームに対する特性の測定を行い、問題なく使用可能であることを確認した [2]。この他、偏向電磁石から放射光を取り出して観測するための測定系について検討中である。

2.6 アライメント

ビーム輸送系は XFEL 光源棟、ビーム輸送系トンネル、シンクロトロン棟の 3 棟にまたがっており、それぞれの間は約 4.4m 厚のコンクリートの壁で仕切られている。そこで、光源棟側とシンクロトロン棟側の両方からトンネル内に基準点を移す。両ビームラインの水平方向の誤差に関しては、最下流の水平方向偏向電磁石 2 台の偏向角と設置位置により調整する。垂直方向の誤差に関しては、垂直方向偏向電磁石 4 台の偏向角と設置位置により調整する。

設置誤差に対するビーム振動の計算結果をもとに、四極電磁石のアライメントのトレランスを表 2 のように決定した。このレベルの誤差がある場合、振幅は最大で 6mm となる。このため、アライメントの目標としてはトレランスの 1/2 以下とした。光源棟内 45m (偏向電磁石 3 台、四極電磁石 13 台) についてレーザトラッカ

を用いてアライメントを完了し、これまでのところ全ての設置誤差をトレランスの 1/5 以内に収めることができた。

表 2: Alignment tolerances for quadrupole magnet

Parameter	Tolerance
Horizontal Δx	0.2 mm
Vertical Δy	0.2 mm
Longitudinal Δs	0.5 mm
Rotation $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_s$	0.2 mrad

3. 考察

3.1 バンチ長の伸びと Emittance growth

偏向電磁石で発生する CSR は、その発生源である電子バンチに幾何学的に追いつき、バンチ内の Longitudinal 方向に次式で示すエネルギー偏差を与える [3]。

$$\frac{dE(z)}{dz} = \frac{Nrmc^2}{\rho^{2/3}\sigma^{4/3}} F\left(\frac{z}{\sigma_z}\right) \quad (1)$$

$$F(x) = -\frac{2}{3^{1/3}} \int_x^\infty \frac{x'dx'}{(x-x')^{1/3}} \frac{e^{-x'^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

偏向電磁石を通過するたびに Energy spread が変化するため、ディスペーションによる Longitudinal 方向の変形は Energy spread を一定と仮定した場合と大きく異なる。そこで、トランスポートラインでのバンチ長の変化について、トラッキングコード “elegant” により計算した [4]。電荷量は 300pC とし、粒子数は 50000 とした。

SSBT 合流点上流までのバンチ長の伸びについてはすでに報告した [5]。入射ビームのバンチ長 30fsec、Energy spread 0.01% (共に r.m.s.) の場合には、CSR による効果が顕著で、バンチ長は 1psec (FWHM) オーダーであった。しかしながら、入射ビームのバンチ長 100fsec、Energy spread 0.1% (共に r.m.s.) の条件では CSR の有無で Longitudinal 方向のビーム形状は異なるものの、バンチ長としては大差なくそれぞれ 250、400fsec であった。

今回新たに SSBT でのバンチ長の伸びも考慮し、蓄積リング入射点でのバンチ長を計算した。SSBT のディスペーションは水平、垂直とも最大で 2.2m であり、合流点上流に比べて 4 倍大きい。このため、CSR の効果が小さい条件 (入射ビームのバンチ長 100fsec、Energy spread 0.1%) でさえ、蓄積リング入射点では CSR を考慮しなくても 9psec、CSR の効果も入れると 10psec (共に FWHM) までバンチ長が伸びることが分かった (図 4 参照)。CSR により Energy spread は実効的に 2 倍となった。

但し、ここでの Longitudinal の位相空間分布はほぼ線形の強いチャープになる。従って、SSBT のオペティクスを根本的に見直さなくても、蓄積リング入射部にシケイン型のバンチ圧縮器を設置すればバンチ長を圧縮することは可能であると考えられる。

また、CSR により Emittance も悪化する [3]。そこで、上記 2 通りの入射ビームの条件において、水平方向の

Emittance growth について計算した (図 5 参照)。入射ビームの Emittance は 0.04nmrad とした。Energy spread 0.1% の例では、蓄積リング入射部で Emittance が 20 倍程度、0.01% の例では 50 倍程度増大した。これらの値は、現状の蓄積リングの Emittance と同レベルである。Emittance growth を抑制するため、ビーム輸送系入射前にバンチ長をある程度伸ばしておくなどの対策も検討中である。

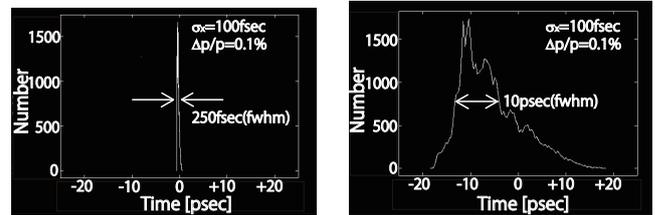


図 4: CSR も考慮した場合のバンチ長の計算結果。左: SSBT 合流点上流部。右: 蓄積リング入射点。

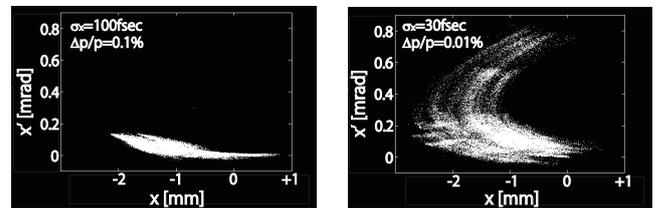


図 5: 蓄積リング入射部での水平方向位相空間内でのビーム分布の計算結果。左: バンチ長 100fsec、Energy spread 0.1% のビームを入射した場合。右: バンチ長 30fsec、Energy spread 0.01% のビームを入射した場合。

4. まとめ

XFEL-Linac から蓄積リングまでのビーム輸送系について検討、設計、及び製作を行った。輸送系の各コンポーネント製作は SSBT への合流部の一部を除き 2009 年度に完了し、2010 年度に据付を実施している。

参考文献

- [1] T.Shintake, "STATUS OF X-RAY FEL/SPRING-8 MACHINE CONSTRUCTION", Proceedings of 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC'08), Genoa, Italy, 2008.
- [2] T.Watanabe, et al., "EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF CURRENT TRANSFORMER FOR ULTRASHORT BUNCHES", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan.
- [3] 横谷馨, ERL 入門, OHO'03 2003.
- [4] M.Borland, "elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation", Advanced Photon Source LS-287, September 2000.
- [5] T.Watanabe, et al., "CSR EFFECT AT XFEL-TO-STORAGE RING BEAM TRANSPORT LINE, SPring-8", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan.